

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
(ВлГУ)

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор  
по образовательной деятельности  
А.А.Панфилов  
20 19 г.



**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**  
**Нелинейная оптика**  
(наименование дисциплины)

Направление подготовки 12.03.05 Лазерная техника и лазерные технологии

Профиль/программа подготовки Лазерные и квантовые технологии

Уровень высшего образования Бакалавриат

Форма обучения очная

Семестр	Трудоемкость зач. ед./ час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	СРС, час.	Форма промежуточной аттестации (экзамен/зачет/зачет с оценкой)
5	4/144	36	18	-	63	Экзамен (27)
Итого	4/144	36	18	-	63	Экзамен (27)

Владимир 2019

## 1. ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Целями освоения дисциплины (модуля) «Нелинейная оптика» является формирование у обучающихся понимания физических основ нелинейных оптических явлений и эффектов, получение практических навыков их расчета и моделирования для последующего использования этих знаний при разработке и оптимизации методов, средств и технологий, использующих лазерное излучение.

Задачи дисциплины:

- теоретическая подготовка в области физики нелинейных явлений, позволяющая будущим инженерам ориентироваться в потоке научной и технической информации и обеспечивающая им возможность использования новых физических принципов нелинейной оптики в областях средств исследований и лазерных технологий;
- формирование нелинейного научного мышления, в частности правильного понимания границ применимости физических понятий, законов, теорий линейной физики и умения оценивать степень достоверности результатов, полученных с помощью экспериментальных или математических методов исследования;
- выработка приемов и навыков решений конкретных задач в области физики нелинейных колебаний и волн, помогающих студентам в дальнейшем решать инженерные задачи.
- ознакомление студентов с современной научной аппаратурой и выработка у них начальных навыков проведения экспериментальных научных исследований физических явлений в области нелинейной оптики и оценки погрешностей измерений.

## 2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОПОП ВО

Дисциплина «Нелинейная оптика» относится к базовой части основной профессиональной образовательной программы Б1.О.29. Изучение дисциплины проходит в пятом семестре.

Для успешного освоения курса физики студентам необходимо знать следующие разделы высшей математики и физики: Дифференциальное исчисление, Интегральное исчисление, Аналитическая геометрия и линейная алгебра, Ряды, Элементы векторного анализа, Функции комплексного переменного, Дифференциальные уравнения, Элементы теории вероятностей и математической статистики, Основы оптики, Основы квантовой электроники.

Освоение дисциплины необходимо для изучения следующих дисциплин учебного плана: «Взаимодействие лазерного излучения с веществом», «Лазерная техника», «Физические и математические принципы адаптивной оптики», «Научно-исследовательская работа в семестре», выполнение выпускной квалификационной работы.

## 3. ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения ОПОП

Код формируемых компетенций	Уровень освоения компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине характеризующие этапы формирования компетенций (показатели освоения компетенции)
1	2	3
<b>ОПК-1</b> Способен применять естественнонаучные и общеинженерные знания, методы математического анализа и моделирования в инженерной	Частичное освоение	<b>Знать:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• основные законы естественных наук;</li><li>• методы математического анализа и моделирования;</li><li>• понимать основные принципы разработки и производства элементов и устройств лазерной техники, лазерных технологических установок, а также оптических материалов и элементов;</li><li>• основную номенклатуру лазерной техники, особенности ее конструкции, технологии производства, а также</li></ul>

<p>деятельности, связанной с проектированием, конструированием и технологиями производства лазерной техники</p>		<p>условия и методы их эксплуатации.</p> <p><b>Уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• применять естественнонаучные и инженерные знания для проектирования, конструирования и производства лазерной техники.</li> </ul> <p><b>Владеть:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• методами расчетов и проектирования технологий и исследований на основе естественнонаучных и инженерных знаний;</li> <li>• методами и компьютерными системами, используемыми при моделировании и проектировании лазерных установок, комплексов, систем и лазерных технологий.</li> </ul>
<p><b>ПК-1</b> Способность проводить работы по обработке и анализу научно-технической информации и результатов исследований</p>	<p>Частичное освоение</p>	<p><b>Знать:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• актуальную нормативную документацию в области профессиональной деятельности;</li> <li>• методы анализа научных данных;</li> <li>• методы и средства планирования и организации исследований и разработок;</li> <li>• основную терминологию на иностранном языке, используемую при оформлении и публикации результатов научных исследований и технических разработок;</li> <li>• основные источники научно-технической информации в области прикладной математики и информатики.</li> </ul> <p><b>Уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• применять актуальную нормативную документацию в области профессиональной деятельности;</li> <li>• оформлять результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, в том числе на иностранном языке;</li> <li>• анализировать научные данные, результаты экспериментов и наблюдений.</li> </ul> <p><b>Владеть:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• навыками составления планов проведения исследований и разработок, в том числе на иностранном языке;</li> <li>• навыками организации сбора и изучения научно-технической информации по теме исследований и разработок, в том числе на иностранном языке;</li> <li>• навыками теоретического обобщения научных данных, результатов экспериментов и наблюдений.</li> </ul>
<p><b>ПК-3</b> Способность организационно и технологически обеспечивать создание информационных систем, автоматизирующих задачи организационного управления и бизнес-процессы</p>	<p>Частичное освоение</p>	<p><b>Знать:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• особенности проектной работы в области профессиональной деятельности;</li> <li>• основы финансового менеджмента, бухгалтерского учёта, налогового законодательства и управления персоналом;</li> <li>• отечественные и международные стандарты по качеству;</li> <li>• средства и стандарты описания и моделирования бизнес-логики предметной области.</li> </ul> <p><b>Уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• выявлять резервы и разрабатывать меры по обеспечению режима ресурсоэффективности при выполнении проекта;</li> <li>• формировать план-график реализации проекта в целом и план контроля его выполнения;</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• выполнять базовые финансовые расчёты по проекту;</li> <li>• учитывать гуманитарные и правовые аспекты прикладной математики и информатики в профессиональной деятельности;</li> <li>• создавать инструменты и методы распространения информации о ходе выполнения работ;</li> <li>• обеспечивать развёртывание информационной системы у заказчика и её интеграцию с существующими информационными системами заказчика;</li> <li>• учитывать при создании информационных систем требования информационной безопасности и защиты интеллектуальной собственности;</li> <li>• следовать правилам ведения документооборота в организациях.</li> </ul> <p><b>Владеть:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• навыками формулирования на основе поставленной проблемы проектной задачи и способа её решения через реализацию проектного управления;</li> <li>• навыками организации и координации работы участников проекта и планирования последовательности шагов для достижения результата;</li> <li>• навыками публичного представления результатов проекта (или отдельных его этапов) в форме отчётов, статей, выступлений на конференциях, семинарах и т.п.;</li> <li>• навыками работы с бухгалтерской и финансовой документацией;</li> <li>• навыками оценки критичных для организации и управления проектами по созданию информационных систем гуманитарных и правовых аспектов;</li> <li>• навыками принятия мер по неразглашению информации о ходе выполнения проекта и защите интеллектуальной собственности;</li> <li>• навыками составления проектов договоров на создание и сопровождение информационных систем.</li> </ul>
<p><b>ПК-4</b> Способность анализировать требования к программному средству</p>	<p>Частичное освоение</p>	<p><b>Знать:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• методы анализа и тестирования требований к программному средству;</li> <li>• методы анализа, проектирования и разработки программного обеспечения.</li> </ul> <p><b>Уметь:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• тестировать требования к программному средству;</li> <li>• оформлять документацию по тестированию;</li> <li>• анализировать требования на соответствие принятым стандартам и методам проектирования;</li> <li>• использовать современные CASE-средства.</li> </ul> <p><b>Владеть:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• навыки выявления противоречий в требованиях одинакового и различных уровней к программному средству;</li> <li>• навыки проверки осуществимости функционирования и сопровождения программного средства;</li> <li>• навыки определения возможности введения изменений и дополнений требований к программному средству.</li> </ul>

#### 4. ОБЪЕМ И СТРУКТУРА ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетных единиц, 144 часа.

№ п/п	Раздел (тема) дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)						Объем учебной работы, с применением интерактивных методов (в часах / %)	Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра), форма промежуточной аттестации (по семестрам)
				Лекции	Практические занятия	Лабораторные работы	Контрольные работы	СРС	КП / КР		
1	Введение в нелинейные оптические явления	5	1-2	4	2	-	-	8	-	2/33,3%	-
2	Теория нелинейно-оптических явлений.	5	3-5	6	4	-	-	14	-	3/30%	Рейтинг-контроль №1
3	Квадратичные среды. Трёхволновое взаимодействие.	5	6-11	12	6	-	-	18	-	6/33,3%	Рейтинг-контроль №2
4	Параметрическое преобразование света.	5	12-18	14	6	-	-	23	-	6/30%	Рейтинг-контроль №3
Наличие в дисциплине КП/КР				-	-	-	-	-	-		-
<b>Итого по дисциплине</b>		<b>144</b>	<b>18</b>	<b>36</b>	<b>18</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>63</b>	<b>-</b>	<b>17/31,4%</b>	<b>экзамен (27 ч.)</b>

#### Содержание лекционных занятий по дисциплине

##### Раздел 1. Введение в нелинейные оптические явления (4 часа).

Тема 1 Введение в нелинейную оптику.

Содержание темы. Предмет нелинейной оптики, история ее развития.

Тема 2 Классификация нелинейно-оптических явлений.

Содержание темы. Классификация нелинейно-оптических эффектов. Некогерентные нелинейно-оптические эффекты. Генерация гармоник. Смещение частот. Вынужденное комбинационное рассеяние света.

##### Раздел 2. Теория нелинейно-оптических явлений (6 часов).

Тема 1 Нелинейный отклик среды.

Содержание темы. Нарушение принципа суперпозиции для сильных световых волн в среде. Разложение поляризации по степеням поля. Нелинейная поляризация. Генерация второй гармоники на основе интегрального подхода. Длина когерентности.

Тема 2 Феноменологическое описание восприимчивостей

Содержание темы. Феноменологическое описание оптических восприимчивостей кристаллических сред. Вектор поляризации; материальное уравнение в кристаллических анизотропных средах. Тензоры нелинейно-оптических восприимчивостей. Общие свойства тензора квадратичной восприимчивости. Уравнения Максвелла – Лоренца в среде. Нелинейный отклик среды. Нелинейная поляризация среды.

##### Раздел 3. Квадратичные среды. Трёхволновое взаимодействие. (12 часов)

Тема 1. Метод медленно меняющихся амплитуд

Содержание темы. Метод медленно меняющихся амплитуд. Стационарные укороченные уравнения. Трёхфотонные взаимодействия. Система стационарных укороченных уравнений. Соотношения Мэнли – Роу.

Тема 2 Генерация второй гармоники (ГВГ).

Содержание темы. Генерация второй гармоники в приближении заданного поля. Фазовый синхронизм и методы его реализации. Виды фазового синхронизма.

Тема 3 Точное решение для генерации второй гармоники

Содержание темы. Точное решение для генерации второй гармоники уравнение для медленно меняющихся амплитуд и фаз. Решение при точном синхронизме. Случай отсутствия второй гармоники на входе нелинейной среды. Захват и срыв захвата обобщенной фазы. ГВГ в отсутствие синхронизма.

Тема 3 Параметрическое усиление

Содержание темы. Параметрическое взаимодействие волн в средах с отрицательным показателем преломления. Укороченное волновое уравнение с учетом временной и пространственной дисперсии. Параметрическое взаимодействие волн с учетом пространственной дисперсии. Параметрическое трехволновое взаимодействие в средах с отрицательной рефракцией.

Тема 4 Нестационарные укороченные уравнения

Содержание темы. Метод медленно меняющихся амплитуд в теории распространения волн. Нестационарные укороченные уравнения. Второе приближение теории дисперсии. Уравнения для пучков и импульсов. Дифракционные эффекты и дисперсионное расплывание импульсов. Общее уравнение для модулированных в пространстве и во времени амплитуд.

Тема 5 Нестационарная ГВГ

Содержание темы. Трехфотонные процессы. Система нелинейных нестационарных уравнений. Нестационарная генерация второй гармоники. Эффект группового запаздывания импульсов; групповой синхронизм. Эффект дисперсионного расплывания импульсов.

Тема 6 Пространственно-временная аналогия

Содержание темы. Диафрагменные апертурные эффекты (оо-е-синхронизм) Пространственно-временная аналогия. Параметрический генератор бегущей волны. Общие требования, предъявляемые к нелинейным кристаллам.

**Раздел 4** Параметрическое преобразование света. (14 часов)

Тема 1 Взаимодействие волн в средах с отрицательной дисперсией

Содержание темы. Параметрическое усиление. Коэффициенты усиления усилителя. Параметрический генератор света. Однорезонаторный и двухрезонаторный параметрический генератор света. Фазовый синхронизм. Перестроечные характеристики и способы перестройки частоты в параметрических генераторах света.

Тема 2 Особенности газовых нелинейно-оптических сред.

Содержание темы. Особенности газовых атомно-молекулярных нелинейно-оптических сред. Четырехфотонные взаимодействия. Укороченные уравнения. Резонансные четырехфотонные процессы. Оценка расчет и интерпретация нелинейных восприимчивостей.

Тема 3 Параметрическое преобразование при рассеянии. Рамановское рассеяние света.

Содержание темы. Комбинационное (рамановское) рассеяние света. Физический механизм рассеяния. Основные уравнения и параметры. Ограничивающие процессы: насыщение резонансного перехода. Параметрическое просветление. Высокочастотный эффект Керра. Условия фазового согласования и методы его реализации в газовых средах.

Тема 4 Антистоксовые компоненты КР

Содержание темы.

Тема 5 Вынужденное комбинационное рассеяние света.

Содержание темы. Порог вынужденного комбинационного рассеяния. Антистоксовы компоненты вынужденного комбинационного рассеяния. Антистоксово вынужденное комбинационное рассеяние на переходах с инверсией населенности.

Тема 6 Обращение волнового фронта

Содержание темы. Вынужденное рассеяние Мандельштама – Бриллюэна. Обращение волнового фронта. Комбинационные лазеры.

Тема 7 Использование нелинейных явлений в лазерах. Обзор.

Содержание темы. Индуцированная прозрачность зеркал резонатора. Перестраиваемые лазеры в спектроскопии. Зеркала с ОВФ. Параметрическое усиление в мощных лазерах.

### **Содержание практических/лабораторных занятий по дисциплине**

Раздел 1. Введение в нелинейные оптические явления

Тема 1 Уравнения Максвелла в нелинейной среде. Вектор нелинейной поляризованности.

Содержание практических занятий. Оценка поляризованности и восприимчивости вещества. Расчёт плотность потока электромагнитной энергии плоской волны.

Раздел 2 Теория нелинейно-оптических явлений

Тема 1. Возбуждение волн нелинейной поляризованности вещества.

Содержание практических занятий. Составление системы уравнений в рамках приближения медленно меняющихся амплитуд

Тема 2 Феноменологическое описание восприимчивостей.

Составление тензора нелинейной восприимчивости для одноосных кристаллов. Вычисление угла синхронизма.

Раздел 3 Квадратичные среды. Трёхволновое взаимодействие.

Тема 1. Укороченные уравнения в квадратичной среде в приближении плоских волн

Содержание практических занятий. Вывод укороченных уравнений и решение задач генерации для квадратичных сред с учётом поглощения.

Тема 2. Нахождение условия фазового синхронизма при трехчастотном взаимодействии в одноосных кристаллах.

Тема 3 Генерация излучения в квадратичных средах

Содержание практических занятий. Решение задач генерации второй гармоники в приближении плоских волн

Раздел 4. Параметрическое преобразование света.

Тема 1. Генерация излучения в квадратичных средах.

Содержание практических занятий Решение задач на исследование генерации второй субгармоники в приближении плоских волн.

Тема 2 Генерация излучения в квадратичных средах

Содержание практических занятий. Решение задач на исследование генерации суммарной и разностной частот в приближении плоских волн.

## **5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

В преподавании дисциплины “Нелинейная оптика” используются разнообразные образовательные технологии как традиционные, так и с применением активных и интерактивных методов обучения.

Активные и интерактивные методы обучения:

*Интерактивная лекция (все темы);*

*Групповая дискуссия (все практические занятия);*

*Ролевые игры (тема №2, 7);*

*Анализ ситуаций (все практические занятия).*

## **6. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ.**

**Текущий контроль** успеваемости является распределённым и основан на оценке нескольких составляющих.

1. Результаты рейтинг-контроля.
2. Выполнение практических индивидуальных заданий.

## Рейтинг-контроль №1

### Вариант 1.

1. Объяснить различный характер взаимодействия световых полей малой и большой интенсивности с веществом.
2. Вычислить отношение нелинейных восприимчивостей  $\chi^{(2m+1)}/\chi^{(2m-1)}$  для соседних нечетных порядков ( $m > 2$ ) как функцию параметра нелинейности, определяемого формулой  $\tilde{E} = E/E_{am}$ .
3. Определить напряженность электрического поля  $E$  в лазерном пучке диаметром 1 мм и мощностью 1 кВт.

### Вариант 2.

1. Каковы физические причины нелинейных оптических явлений?
2. Преобразовать формулу для критической интенсивности лазерного пучка так, чтобы с помощью нее можно было определять критическую амплитуду светового вектора в лазерном пучке. 
$$I_{cr} = \frac{\lambda^2 k_T}{16\pi\mu_0 a^4} \cdot \left| \frac{dn}{dT} \right|^{-1}.$$
3. Оценить диаметр пятна в фокусе объектива для лазерного излучения мощностью 10 кВт, если требуется обеспечить напряженность электрического поля  $E = 3 \cdot 10^4$  В/см.

### Вариант 3.

1. Каков физический смысл величины  $\chi^{(m)}$  – нелинейной восприимчивости  $m$ -го порядка?
2. Вычислить параметр нелинейности  $\tilde{E} = E/E_{am}$  для излучения импульсного лазера интенсивностью  $I = 10^{14}$  Вт/м<sup>2</sup>, распространяющегося в одноатомном однородном кристалле, не являющемся магнитным материалом ( $\mu = 1$ ), с характерной напряженностью внутриатомного поля  $E_{ат} = 10^{10}$  В/м и показателем преломления  $n = 1,5$ .
3. Определить плотность мощности лазерного излучения  $N$ , если напряженность электрического поля этого излучения  $E = 10^5$  В/см.

### Вариант 4.

1. Каковы физические причины одновременного возникновения нескольких волн с кратными частотами в нелинейной среде?
2. Записать формулу  $P = \varepsilon_0 \chi^{(1)} E$  для анизотропного линейного оптического кристалла.
3. Определить напряженность электрического поля  $E$  в лазерном пучке диаметром 1 мм и мощностью 10 кВт.

### Вариант 5.

1. Каковы физические причины одновременного возникновения нескольких волн с кратными частотами в нелинейной среде?
2. Показать, что если на среду воздействуют две плоские монохроматические волны с различными частотами  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , то квадратичная поляризованность среды будет содержать гармонические составляющие на частотах  $2\omega_1$ ,  $2\omega_2$ ,  $\omega_1 - \omega_2$  и  $\omega_1 + \omega_2$ .
3. Оценить диаметр пятна в фокусе объектива для лазерного излучения мощностью 10 кВт, если требуется обеспечить напряженность электрического поля  $E = 1 \cdot 10^4$  В/см.

### Вариант 6.

1. Каковы физические причины одновременного возникновения нескольких волн с кратными частотами в нелинейной среде?
2. Записать волновое уравнение

$$\Delta E_i = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left[ \sum_{k=1}^3 (1 + \chi_{ik}^{(1)}) E_k \right] + \mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left[ \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^3 \chi_{ikj}^{(2)} E_k E_j + \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{m=1}^3 \chi_{ikjm}^{(3)} E_k E_j E_m + \dots \right];$$

а) для анизотропного линейного; б) изотропного линейного; в) кубично-нелинейного оптических кристаллов.

3. Определить плотность мощности лазерного излучения  $N$ , если напряженность электрического поля этого излучения  $E = 106$  В/см.

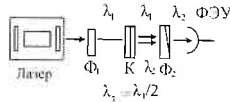


*Вариант 7.*

1. Объяснить сущность некогерентных нелинейных эффектов в оптике.
2. Показать, почему наибольший вклад в нелинейные оптические процессы будут давать низшие члены в разложении  $P(E) = \varepsilon_0 [\chi^{(1)}E + \chi^{(2)}E^2 + \dots + \chi^{(m)}E^m + \dots]$ .
3. Оценить диаметр пятна в фокусе объектива для лазерного излучения мощностью 1 кВт, если требуется обеспечить напряженность электрического поля  $E = 1 \cdot 10^4$  В/см.

*Вариант 8.*

1. Пояснить схему опыта П. Франкена по наблюдению генерации второй гармоники.



2. Получить волновое уравнение для среды с нелинейной поляризованностью, записанное для магнитной составляющей электромагнитного поля.
3. Оценить интенсивность лазерного излучения, когда поле  $E$  в пучке становится сопоставимым с внутриатомным и разложение поляризации  $P$  по степеням поля  $E$  теряет смысл. ( $3.5 \cdot 10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup>).

*Вариант 9.*

1. В чем состоит физический смысл волнового (фазового) синхронизма?
2. Записать формулу  $P = \varepsilon_0 \chi^{(1)} E$  для анизотропного линейного оптического кристалла.
3. Оценить плотность потока энергии  $I$  лазерного излучения, при которой происходит электрический пробой сухого очищенного от пыли воздуха. Какая при этом амплитуда напряженности электрического поля  $E_0$ ? Какой мощности  $P$  лазера это соответствует, если лазерный луч имеет диаметр  $d = 0.3$  мм? Длина волны излучения  $\lambda = 10.6$  мкм (СО<sub>2</sub>-лазер), длительность импульса  $t_{\text{имп}} = 1$  мкс, ионизация в сухом воздухе происходит при энергии электронов  $U = 12$  эВ, длина свободного пробега электронов  $l = 3 \cdot 10^{-4}$  см.

*Вариант 10.*

1. В чем заключается полуклассический подход при рассмотрении взаимодействия электромагнитного излучения с веществом?
2. Дать математическую запись условий того, что некоторая оптическая среда является слабопоглощающей и слабонелинейной.
3. Определить тензор квадратичной восприимчивости  $\chi^{(2)}$  у кристалла KDP, обладающего симметрией 42m (тетрагональная сингония) для  $\lambda = 1.064$  мкм. ( $d_{36} = (1.1 \pm 0.3)10^{-9}$  СГСЭ,  $d_{14} = (0.95 \pm 0.06)d_{36}$ ).

*Вариант 11.*

1. Объяснить, как влияет симметрия оптического кристалла на его нелинейную поляризацию.
2. Закон дисперсии нелинейных восприимчивостей и чем она обусловлена?
3. Определить вид тензора линейной восприимчивости  $c_{ij}$ , если поляризация  $P$  ( $P_i = c_{ij}E_j$ ) ориентирована параллельно электрическому полю  $E$ .

*Вариант 12.*

1. Пояснить, почему в кварцевых стеклах, применяемых в оптических световодах, не могут иметь место нелинейные эффекты второго порядка.
2. Каков физический смысл величины  $\chi^{(m)}$  – нелинейной восприимчивости  $m$ -го порядка?
3. Тензор диэлектрической проницаемости для кристалла имеет вид

$$\begin{pmatrix} 3 & 1 & 0 \\ 1 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \end{pmatrix} \text{Приведите этот тензор к главным осям.}$$

**Рейтинг-контроль №2**

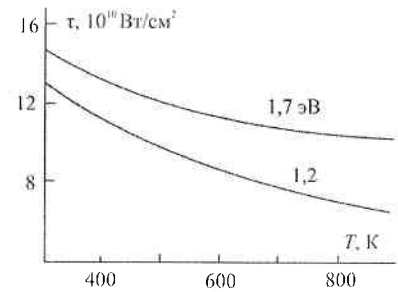
*Вариант 1.*

1. Пояснить границы применимости линейной модели Друде – Лоренца взаимодействия излучения с веществом.

- Объяснить, почему для прозрачной (непоглощающей) оптической среды  $\text{Im } \chi^{(1)} = 0$ .
- Каков физический смысл просветления поглощающей среды?
- Считая известной естественную ширину возбужденного атомного уровня  $\gamma_0$ , оценить неопределенность  $\delta\lambda$  длины волны фотона, излучаемого при переходе электрона с данного энергетического уровня на уровень с меньшей энергией.

*Вариант 2.*

- Объяснить физический смысл членов в уравнении движения вынужденных затухающих колебаний одного осциллятора.
- Какова связь между нелинейными поляризованностями смежных порядков  $P^{(n)}$ ,  $P^{(n+1)}$  и параметром нелинейности  $\bar{E} = E/E_{ат}$ .
- Каков физический смысл эффективного сечения многофотонного процесса  $\sigma(k)$  и от каких параметров он зависит?
- Дать физическое объяснение характера зависимостей, представленных на рис.



*Вариант 3.*

- Получить зависимость линейной восприимчивости  $\chi^{(1)}(\omega)$  от частоты для среды, в которой колебания оптических электронов являются гармоническими, и имеется только одна резонансная частота. Изобразить эту зависимость графически.
- Дать характеристику модели ангармонического осциллятора с кубичной нелинейностью в рамках модели ангармонического осциллятора? ( $K_2 = 0$ ) -уравнение Дуффинга. Какой процесс оно описывает?
- Пояснить, почему для двухфотонного фотоэффекта величина силы тока в фотоэлементе пропорциональна квадрату мощности лазерного излучения, падающего на катод фотоэлемента.
- В чем состоит эффект Штарка?

*Вариант 4.*

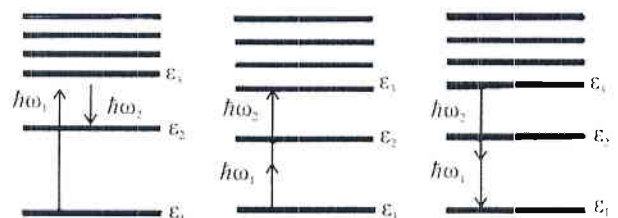
- Какую новую информацию позволяют получить модели ангармонических осцилляторов по сравнению с линейной моделью?
- Обосновать необходимость квантовой модели взаимодействия излучения с веществом.
- Почему в оптическом кристалле имеет место резкий рост вероятности многофотонных процессов при увеличении интенсивности падающего лазерного излучения?
- Имеются два импульсных лазера, излучающих на одной частоте, но с различными длительностями импульсов: соответственно  $\tau_1 = 1 \text{ нс}$  и  $\tau_2 = 10^{-3} \text{ нс}$ . Какой из них и почему предпочтительнее для использования в оптоволоконных линиях с точки зрения обеспечения стойкости к оптическому пробое?

*Вариант 5.*

- Показать, что в нелинейных средах нарушается принцип неизменности частоты света при переходе из одной среды в другую.
- Доказать, что в рамках квантовой модели взаимодействие интенсивного светового поля с веществом представляет собой нелинейный процесс.
- Чем отличается процесс двухфотонного перехода от процесса, представляющего собой два последовательных однофотонных перехода?
- Сравнить время жизни атома в виртуальном состоянии с временем жизни в реальном возбужденном состоянии при двухфотонном переходе.

*Вариант 6.*

- На основе формулы  $\chi(\omega) = \chi^{(1)}(\omega) + \chi^{(3)}(\omega)E_m^2$  получить зависимость показателя преломления оптической среды от интенсивности падающего излучения.
- В чем состоят физические особенности задачи о резонансном взаимодействии двухуровневой квантовой системы с монохроматическим излучением,



обычно выражаемые понятием «атом, одетый полем»?

3. Записать закон сохранения энергии для двухфотонных процессов, показанных на рис.
4. Доказать, что оптический пробой является нелинейным процессом.

*Вариант 7.*

1. Какие физические результаты позволяет получить модель бигармонического возбуждения осциллятора с квадратичной нелинейностью?
2. В чем состоит принципиальное отличие между слабым и сильным внешним полем в задаче о резонансном взаимодействии двухуровневой квантовой системы с монохроматическим излучением?
3. Какова связь между эффектами генерации высших гармоник и многофотонными процессами?
4. Как и почему пороговая мощность оптического пробоя зависит от длительности импульса излучения?

*Вариант 8.*

1. В чем состоит правило Р. Миллера и к каким практическим выводам оно приводит?
2. Привести примеры нелинейных оптических явлений, обусловленных наличием градиентов термодинамических величин.
3. Объяснить, почему ни при каком обычном (не лазерном) источнике света многофотонные процессы в оптических кристаллах не наблюдаются.
4. Получить математическое выражение закона Бугера для нелинейного поглощения.

*Вариант 9.*

1. Дать физическое объяснение тому, что в формулу  $\chi^{(3)} = \frac{3}{4} \chi^{(1)}(\omega) \delta \frac{(e/m)^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^3}$  для кубической восприимчивости  $\chi^{(3)}$  не входит квадратичная восприимчивость  $\chi^{(2)}$ .
2. В чем сходство и различие между однофотонными и многофотонными процессами?
3. Используя фундаментальные закономерности квантовой физики, объяснить физическую природу промежуточных состояний, через которые проходит атомный электрон при многофотонном процессе.

*Вариант 10.*

1. Получить зависимость линейной восприимчивости  $\chi^{(1)}(\omega)$  от частоты для среды, в которой колебания оптических электронов являются гармоническими, и имеется только одна резонансная частота.
2. Могут ли быть одни двухфотонные процессы линейными, а другие – нелинейными? Ответ пояснить на примерах.
3. При каких допущениях справедливо выражение для вероятности многофотонного перехода  $w^{(k)} = \prod_i w^{(i)} = [w^{(1)}]^k \approx I^k$ ? Почему в ряде случаев строгая степенная зависимость нарушается?
4. Объяснить, почему нелинейное поглощение на несколько порядков величины больше линейного поглощения.

**Рейтинг-контроль №3**

*Вариант 1.*

1. Показать, что выражение  $n(\omega, E) = n(\omega) + n_{\text{нл}} E^2$  для показателя преломления нелинейной среды получается как результат вклада кубической восприимчивости  $\chi^{(3)}$ .
2. Пояснить работу ВКР-лазеров и ВКР-усилителей.
3. Показать, что дисперсия групповых скоростей имеет место и для линейных, и для нелинейных волн.
4. Каковы основные свойства солитонов?

*Вариант 2.*

1. Объяснить, почему в выражении для  $n_{\text{нл}} E^2 = n_2 I + n_4 I^2 + \dots$  для нелинейной части показателя преломления присутствуют только четные степени амплитуды светового вектора.
2. В чем отличие спонтанного от вынужденного рассеяния Манделъштама – Бриллюэна?

3. Дать характеристику уравнения Кортевега – де Фриза.
4. Объяснить, почему групповой солитон не может содержать слишком большое (более 20) количество волн.

*Вариант 3.*

1. Как влияет знак рефракционного индекса на характер эволюции светового пучка в оптической среде?
2. Почему явление вынужденного рассеяния Манделъштама – Бриллюэна аналогично явлению дифракции на пространственной решетке?
3. Сравнить структуру уравнения Кортевега – де Фриза и нелинейного уравнения Шредингера и физический смысл членов в этих уравнениях.
4. Сравнить свойства параметрического усиления со свойствами ВКР-усиления и ВРМБ-усиления.

*Вариант 4.*

1. Пояснить, в чем состоит нелинейный характер явления самофокусировки светового пучка.
2. Доказать, что при вынужденном рассеянии Манделъштама – Бриллюэна волна накачки и волна рассеянного излучения распространяются в противоположных направлениях.
3. Что характеризуют дисперсионные коэффициенты  $\beta_1$  и  $\beta_2$  в обобщенном уравнении являющимся обобщением уравнения КдФ и нелинейного уравнения Шредингера?
4. Почему четырехволновое смешение является одним из самых нежелательных нелинейных оптических эффектов в оптоволоконных системах передачи информации?

*Вариант 5.*

1. Привести математическую формулу, доказывающую, что при фазовой самомодуляции форма оптических импульсов не изменяется.
2. В чем состоит полезное и вредное влияние вынужденного рассеяния Манделъштама – Бриллюэна для оптоволоконных линий связи?
3. Проверить с точки зрения размерности физических величин, что правые части формул для дисперсионной длины и нелинейной длины дают характерные длины (дисперсионная длина и нелинейная длина).
4. Для чего в волоконных линиях передачи информации применяется сжатие оптических импульсов? До каких величин сжимаются импульсы?

*Вариант 6.*

1. Какова связь между явлениями самофокусировки и фазовой самомодуляции?
2. Построить качественно графическую зависимость для спектра ВРМБ усиления.
3. В чем состоит математическое и физическое содержание понятия «модуляционная неустойчивость»?
4. Доказать, что образование оптического солитона – это нелинейный физический процесс.

*Вариант 7.*

1. Почему при малой величине кубичной восприимчивости  $\chi^{(3)}$  кварцевого стекла нелинейные эффекты тем не менее играют существенную роль в оптоволоконных линиях передачи информации?
2. Сравнить пороговые мощности для вынужденного комбинационного рассеяния и вынужденного рассеяния Манделъштама – Бриллюэна.
3. Объяснить, почему групповой солитон не может содержать слишком большое (более 20) количество волн.
4. Как можно использовать солитоны в оптоволоконных линиях связи?

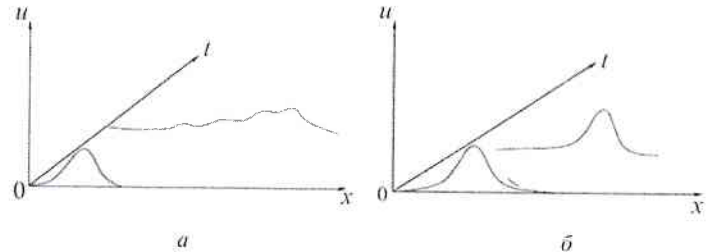
*Вариант 8.*

1. Пояснить физический смысл членов в уравнении для нелинейного набега фазы для светового импульса.
2. Каковы методы противодействия негативному влиянию вынужденного комбинационного рассеяния и вынужденного рассеяния Манделъштама – Бриллюэна в оптоволоконных линиях связи?

3. Как влияют оптические потери в волокне на модуляционную неустойчивость при распространении лазерных импульсов?
4. Пояснить значение понятия «период солитона».

*Вариант 9.*

1. Объяснить, почему фазовая самомодуляция приводит к частотной модуляции оптических импульсов.
2. Доказать, что максимальный коэффициент ВРМБ-усиления имеет место при совпадении частоты накачки и бриллюэновского частотного сдвига.
3. Чем объясняется различный характер эволюции волнового пакета на рис. а и б?
4. Сравнить свойства фундаментального солитона и оптических солитонов высших порядков.



*Вариант 10.*

1. Доказать, что явления вынужденного комбинационного рассеяния и вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна накладывают ограничения на максимальную мощность оптических импульсов, используемых в оптоволоконных линиях передачи информации.
2. Показать, что линейная комбинация двух решений волнового уравнения для электрической составляющей также является решением этого уравнения.
3. Сравнить структуру уравнения Кортевега де Фриза и нелинейного уравнения Шредингера, и физический смысл членов в этих уравнениях.
4. Пояснить условия, необходимые для формирования оптических солитонов.

**Промежуточная аттестация** проходит в форме экзамена.

**Вопросы к экзамену**

1. Классификация нелинейно-оптических эффектов
2. Когерентные и не когерентные нелинейно-оптические эффекты
3. Нелинейное поглощение света
4. Генерация суммарных и разностных частот. Параметрическая генерация
5. Уравнения Максвелла – Лоренца в среде. Нелинейный отклик среды.
6. Разложение поляризации по степеням поля. Нелинейная поляризация.
7. Генерация второй гармоники (интегральный подход)
8. Феноменологическое описание оптических восприимчивостей кристаллических сред.
9. Тензоры оптических восприимчивостей Перестановочные соотношения. Свойства симметрии оптических сред.
10. Метод медленно меняющихся амплитуд для среды с квадратичной нелинейностью (трехфотонные взаимодействия)
11. Система стационарных укороченных уравнений. Приближение заданного поля. Соотношения Мэнли – Роу.
12. Генерация второй гармоники (ГВГ) в приближении заданного поля
13. Фазовый синхронизм и методы его реализации. Виды фазового синхронизма.
14. Уравнения для медленно меняющихся действительных амплитуд и фаз.
15. Точное решение для генерации второй гармоники. Захват фазы.
16. Параметрический генератор света (ПГС). Параметрическое усиление. Коэффициенты усиления параметрического усилителя.
17. Параметрический генератор. Перестройка частоты. Однорезонаторный и двух резонаторный ПГС. Параметрический генератор встречной волны.
18. Метод медленно меняющихся амплитуд в теории распространения волновых пакетов. Нестационарные укороченные уравнения.
19. Второе приближение теории дисперсии. Уравнения для пучков и импульсов.

20. Дифракционные эффекты. Дисперсионное расплывание импульсов. Общее уравнение для модулированных в пространстве и во времени амплитуд.
21. Трехфотонные процессы. Система нелинейных нестационарных уравнений.
22. Нестационарная ГВГ. Эффект группового запаздывания импульсов. Групповой синхронизм. Эффект дисперсионного расплывания импульсов.
23. Особенности газовых атомных и молекулярных нелинейно-оптических сред. Четырехфотонные взаимодействия.
24. Укороченные уравнения. Резонансные четырех фотонные процессы. Оценка, расчет и интерпретация нелинейных восприимчивостей.
25. Взаимодействие волн в средах с отрицательной дисперсией. Насыщение резонансного перехода. Динамический эффект Штарка.
26. Параметрическое просветление. Высокочастотный эффект Керра.
27. Движение населенностей и нарушение синхронизма.
28. Комбинационное (Рамановское) рассеяние света. Вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР). Основные уравнения и параметры. Порог ВКР.
29. Антистоксовы компоненты ВКР. Антистоксово ВКР на переходах с инверсией населенности.
30. Обращение волнового фронта. Комбинационные лазеры.

**Самостоятельная работа** студентов включает в себя:

1. Аудиторная самостоятельная работа студента по дисциплине выполняется на практических занятиях при решении задач.

2. Внеаудиторная самостоятельная работа выполняется студентом при углубленном изучении дисциплины по теме пройденной лекции, при подготовке к практическим занятиям. Основной формой самостоятельной работы студента является изучение конспекта лекций, рекомендованной литературы и решения конкретных задач.

Самостоятельная работа завершает задачи всех других видов учебного процесса и может осуществляться на лекциях, семинарах, практических занятиях, консультациях. Как форма организации учебного процесса самостоятельная работа студентов представляет собой целенаправленную систематическую деятельность по приобретению знаний, осуществляемую вне аудитории.

Контроль выполнения самостоятельной работы осуществляется в ходе выполнении практических заданий и на экзамене.

#### ***Вопросы для контроля самостоятельной работы***

1. Каковы физические величины, определяющие нелинейно-оптические эффекты?
3. Каковы физические величины, обуславливающие эффекты Керра и просветление?
4. Какова по порядку величины напряженность внутриатомного поля?
5. Что называют вынужденным комбинационным рассеянием?
6. Каковы условия, определяющие эффективность генерации второй гармоники?
7. Каковы области применения параметрической генерации света?
8. Назовите эффекты, обусловленные второй и третьей степенью нелинейности (вторым и третьим членом разложения поляризации по полю).
9. Какова физическая величина, определяющая пространственное накопление нелинейного эффекта?
10. Назовите последовательность этапов в процессе генерации второй гармоники.
12. Что такое волновая расстройка? Сформулируйте условие фазового синхронизма.
13. В каких средах может выполняться условие фазового синхронизма?
14. Что понимают под нелинейным откликом среды? Дайте классификацию нелинейно-оптических эффектов.
15. Приведите примеры одноосных и двуосных кристаллов.
17. Каково максимальное число независимых компонент квадратичного тензора оптической восприимчивости?
18. По какой схеме осуществляются трехфотонные процессы?

19. Что называют ео-о; ее-о; оо-е -взаимодействиями? Определите понятие «обобщенная фаза»?

20. Что называют параметрическим усилением света? На какие составляющие распадается волна накачки при параметрической генерации света? Что называют обратной длиной?

21. Что называют сигнальной волной, а что называют холостой волной? Каким образом усилитель может быть превращен в генератор? Каково условие самовозбуждения при параметрической генерации света?

22. Что называют дисперсионным расплыванием? В чем суть квазиоптического приближения?

23. Каков режим генерации второй гармоники при использовании сверхкоротких лазерных импульсов?

24. При выполнении какого условия возможны четырехфотонные процессы? При каких условиях возможно нелинейно-оптическое смешение частот и какой вид имеет коэффициент нелинейной связи при четырехфотонных процессах?

Фонд оценочных средств для проведения аттестации уровня сформированности компетенций обучающихся по дисциплине оформляется отдельным документом.

## 7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ.

### 7.1. Книгообеспеченность

Наименование литературы: автор, название, вид издания, издательство	Год издания	КНИГООБЕСПЕЧЕННОСТЬ	
		Количество экземпляров изданий в библиотеке ВлГУ в соответствии с ФГОС ВО	Наличие в электронной библиотеке ВлГУ
1	2	3	4
<b>Основная литература*</b>			
1. Старовойтов, А. А. Лабораторный практикум по основам нелинейной оптики : учебное пособие / А. А. Старовойтов. — Санкт-Петербург : НИУ ИТМО, 2019. — 74 с.— Текст: электронный// Лань : электронно-библиотечная система.	2019		URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/136399">https://e.lanbook.com/book/136399</a>
2. Червяков Г.Г. Нелинейные процессы СВЧ-электроники и когерентной оптики [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Червяков Г.Г.— Электрон. текстовые данные.— Ростов-на-Дону, Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2017.— 298 с.	2017		Режим доступа: <a href="http://www.iprbookshop.ru/87447.html">http://www.iprbookshop.ru/87447.html</a> .— ЭБС «IPRbooks»
3. Нелинейные явления в нано- и микрогетерогенных системах [Электронный ресурс]/ С.А. Гриднев [и др.].— Электрон. текстовые данные.— Москва: Лаборатория знаний, 2020.— 353 с.	2020		Режим доступа: <a href="http://www.iprbookshop.ru/4605.html">http://www.iprbookshop.ru/4605.html</a> .— ЭБС «IPRbooks»
<b>Дополнительная литература</b>			
1. Акципетров, О. А. Нелинейная оптика кремния и кремниевых наноструктур : монография / О. А. Акципетров, И. М. Баранова, К. Н. Евтюхов. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2012. — 544 с. — ISBN 978-5-9221-1402-8. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система	2012		URL: <a href="https://e.lanbook.com/book/5255">https://e.lanbook.com/book/5255</a>
2. Шандаров С.М. Введение в нелинейную оптику [Электронный ресурс]: учебное пособие для студентов направлений подготовки «Фотоника и оптоинформатика», «Электроника и наноэлектроника», «Электроника и микроэлектроника»/ Шандаров С.М.— Электрон. текстовые данные.— Томск: Томский	2012		Режим доступа: <a href="http://www.iprbookshop.ru/72073.html">http://www.iprbookshop.ru/72073.html</a> .— ЭБС «IPRbooks»

государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012.— 41 с.			
3. Корель И.И. Нелинейные волновые уравнения в оптике [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Корель И.И.— Электрон. текстовые данные.— Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2010.— 40 с.	2010		Режим доступа: http://www.iprbookshop.ru/45120.html.— ЭБС «IPRbooks»

### 7.2. Периодические издания

1. Квантовая электроника: <http://www.quantum-electron.ru>
2. Успехи физических наук: <http://ufn.ru>
3. Журнал технической физики и Письма в ЖТФ: <http://journals.ioffe.ru/pjtf>

### 7.3. Интернет-ресурсы

1. <http://www.laser.ru>
2. <http://www.cislaser.com>
3. <https://www.comsol.ru/events/>

## 8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Преподавание дисциплины предусматривает применение мультимедийных презентаций и компьютерных симуляций, что обеспечивается проведением занятий в оборудованных мультимедийным оборудованием аудиториях кафедры ФиПМ. Для обеспечения проведения практических работ имеются компьютерные классы кафедры ФиПМ.

Аудитории для проведения занятий оснащены современными персональными компьютерами, объединёнными в локальную вычислительную сеть и укомплектованными необходимым системным и прикладным программным обеспечением.

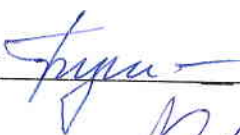
Для реализации данной дисциплины имеются специальные помещения для проведения занятий лекционного типа, занятий практического/лабораторного типа, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для самостоятельной работы.


Практические занятия проводятся в аудитории (компьютерном классе) 511-3 (или аналогичном компьютерном классе в зависимости от сетки расписания).

Перечень используемого лицензионного программного обеспечения:

1. Прикладное программное обеспечение: Браузер; Adobe Reader; MS Word; MS Excel; MS PowerPoint и др.
2. Среда разработки MS Visual Studio или аналоги.
3. Прикладные математические пакеты: Maple; MathCad; MatLab и др.




Рабочую программу составил профессор кафедры ФиПМ О.Я. Бутковский   
(ФИО, подпись)

Рецензент  
(представитель работодателя) Тен. директор ООО "Владим.Тех" Акипов А.В.   
(место работы, должность, ФИО, подпись)


Программа рассмотрена и одобрена на заседании кафедры ФиПМ

Протокол № 1 от 02.09.2019 года

Заведующий кафедрой ФиПМ \_\_\_\_\_ С.М. Аракелян  
(ФИО, подпись) 

Рабочая программа рассмотрена и одобрена на заседании учебно-методической комиссии  
направления 12.03.05 Лазерные и квантовые технологии

Протокол № 1 от 02.09.2019 года

Председатель комиссии \_\_\_\_\_ С.М. Аракелян  
(ФИО, подпись) 

**ЛИСТ ПЕРЕУТВЕРЖДЕНИЯ  
РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ ДИСЦИПЛИНЫ**

Рабочая программа одобрена на \_\_\_\_\_ учебный год

Протокол заседания кафедры № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ года

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ С.М. Аракелян

Рабочая программа одобрена на \_\_\_\_\_ учебный год

Протокол заседания кафедры № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ года

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ С.М. Аракелян

Рабочая программа одобрена на \_\_\_\_\_ учебный год

Протокол заседания кафедры № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ года

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ С.М. Аракелян